香蕉苗期氮素亏缺与补偿对植株生长和根系形态的影响研究

赵 明，武 鹏，何海旺，龙 芳，莫天利，黄 相，邹 瑜*
（广西农业科学院生物技术研究所，南宁 530007）

摘 要：为探究氮素亏缺及亏缺后补偿供氮对蕉苗生长及其根系形态特征的影响。该研究以主要栽培种基因组类型（AAA 型和ABB 型）的香蕉品种为试材，通过石英砂基质培养结合氮素亏缺与补偿处理，研究其株高、叶长、叶宽和新增绿叶数，地上部、根系的鲜重和干物质，根长、根表面积及根体积等指标的变化。结果表明：（1）亏缺30 d，香蕉苗呈现明显的缺氮表型症状，株高、叶长、叶宽及新增绿叶数均显著降低；根系干物质积累增加，品种I、II根系干物质分别提高64.71%、87.50%，根冠比增加；总根表面积分别增加4.38%、11.85%，体积增加71.78%、66.55%。（2）亏缺68 d，干物质积累受到明显抑制，品种I、II全株干物质降低33.74%、42.04%，根系干物质与常规处理无显著差异；根系形态参数变化趋势与轻度亏缺一致。（3）亏缺后补偿供氮，缺氮症状消失，植株生长指标恢复正常水平；品种I、II根系干物质质量显著增加51.22%52.38%，根冠比显著高于常规处理；根系趋向正常形态生长，且总根体积分别增加61.80%、45.92%。轻度氮素亏缺后适时补偿供氮，缺氮蕉苗可恢复正常生长，根系干物质及体积显著高于常规处理，且幼苗的长势更好。生产中可以综合利用亏缺胁迫后补偿供氮的方式来培育香蕉苗，以利于其在田间栽培的生长。

关键词：氮素，亏缺，补偿效应，香蕉，根系形态
中图分类号：Q945; S668.1　　　　**文献标识码：**A

Effects of N deficiency and compensation of N nutrient on banana growth and root morphology

ZHAO Ming, WU Peng, HE Haiwang, LONG Fang, MO Tianli, HUANG Xiang, ZOU Yu*
(*Bio-technology Research Institute, Guangxi Academy of Agricultural Sciences*, Nanning 530007,China)

Abstract: In order to explore the effects of N deficiency and compensation of N nutrient on the growth and root morphology of banana. In this experiment, two main cultivars genome types (AAA and ABB) were used as materials, Plant height, leaf length, leaf width, number of new green leaves, fresh weight and dry matter of shoot and root, root length, root surface area and root volume were studied by using quartz sand matrix culture combined with N deficiency and compensation treatment. The results were as follows: (1)The plant height, leaf length, leaf width

---

基金项目：财政部和农业农村部：国家现代农业产业技术体系；广西自然科学基金(2021GXNSFBA075045, 2019 GXNSFAA245021）；第二十二批广西十百千人才工程第二层次人选专项资金；广西农业科学院基本科研业务专项（桂农科 2021YT088）；广西农业科学院科技发展基金（桂农科 2021JM17）[Supported by China Agriculture Research System of MOF and MARA; Guangxi Natural Science Foundation(2021GXNSFBA075045, 2019 GXNSFAA245021); Twenty-two Guangxi One Million Talent Project Level 2 Candidate Special Fund; Foundamental Research Fund of Guangxi Academy of Agricultural Sciences(2021YT088); Science and Technology Development Fund of Guangxi Academy of Agricultural Sciences(2021JM17)]。

作者简介：赵明（1985-），硕士，副研究员，主要从事香蕉资源与育种研究工作，(E-mail)zhaoming@gxaas.net。
***通信作者：**邹瑜，研究员，主要从事香蕉资源与育种研究工作，(E-mail)zy@gxaas.net。

and the number of new green leaves decreased significantly, after 30 d N deficiency of varieties I and II, the dry matter of root system increased by 64.71% and 87.50%, and the ratio of root to shoot increased, the total root surface area and volume increased by 4.38% and 11.85%,71.78% and 66.55% respectively. (2)After 68 d N deficiency of varieties I and II, the dry matter of the whole plant decreased by 33.74% and 42.04%, and there was no significant differences between the conventional treatment and the conventional treatment. (3)After the deficiency, N supply was compensated, the symptom of N deficiency disappeared, and the plant growth index returned to normal level. The dry matter weight of the cultivars I and the total root system increased by 51.22% and 52.38%, and the root-shoot ratio was significantly higher than that of the conventional treatments. Roots tended to grow in normal shape, and total root volume increased by 61.80% and 45.92%, respectively. The root system volume increased significantly and the plant growth vigor was better when the N compensation was timely. In order to promote the growth of banana seedlings in the field, the method of deficiency compensation can be comprehensively used in the production.

Key words: N, deficiency, compensation effect, banana, root morphology

香蕉是全球贸易量及消费量最大的鲜果，在我国农业经济发展中起到重要作用（胡从九，2020）。香蕉生产中大多延用过量偏施氮肥的传统耕作模式，因此，造成大量的肥料浪费（颜晓元，2018）、蕉园土壤酸化、养分含量下降（Guo et al., 2010；Wu et al., 2018），并引发严重的环境污染问题（Ju et al., 2009）。研究表明，香蕉的氮素吸收量约为 108 g 株$^{-1}$（樊小林，2007），而我国香蕉的施氮量已达 440～580 g 株$^{-1}$，远大于其氮素吸收量（曹明等，2012）。广西蕉园由于常年的施肥不当，造成土壤酸性强（pH＜5.5），有机质及碱解氮含量低（＜20 和＜100 mg kg^{-1}），土壤肥力瘦瘠问题严重（魏守兴等，2012）。氮肥利用率普遍偏低，增氮不增产（Ju et al., 2009），氮素成为蕉园土壤养分最重要的限制因子之一（杨苞梅等，2008），对氮素的动态管理始终是农业生产中首要的措施。因此，如何减少氮肥的投入量、提高氮肥有效利用率、降低环境污染风险是香蕉产业健康发展亟需解决的科学问题。

补偿效应是阈值内的胁迫压力后作物在生理水平和结构上产生的利于生长发育和产量形成的能力（赵明等，2006），是自然界普遍存在的一种生物现象（Acevedo et al., 1971）。国内外研究者虽然已对玉米、大豆、小麦等粮食作物的氮素亏缺补偿效应进行了较为深入的研究（翟丙年等，2005；褚丽丽等，2010；汤国平等，2017），但对香蕉这一优良草本果树的氮素亏缺补偿效应进行系统探讨的报道鲜见。香蕉植株高大，追肥次数多（郭春铭等，2017），生产中某一生长阶段错过氮肥施入，后期补氮的养分管理措施屡见不鲜，缺氮香蕉苗在补施氮肥后表型性状可恢复正常（刘芳等，2019），然而长时间的氮素亏缺势必造成生长受限，因此，需要研究适度氮素亏缺后补偿供氮对植株生长和根系形态特征的影响。据此，本研究以栽培种中最重要的两种基因组类型（AAA 型普通香蕉和 ABB 型粉蕉）的香蕉品种为试材，开展苗期石英砂基质培养试验，研究氮素亏缺与补偿条件下香蕉苗生长、干物质质量、根系形态的变化，以期揭示氮素亏缺后恢复供氮对香蕉苗的补偿生长效应，为生产上利用香蕉品种自身调节和补偿机制，发挥氮高效利用潜力，合理施氮提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

试验在广西壮族自治区农业科学院防虫网室进行。供试品种I为 AAA 型普通香蕉‘宝岛蕉’，品种II为 ABB 型粉蕉‘育粉 6 号’，选取长势均匀一致，5 叶 1 心期组培苗为试验

材料，育苗容器为带托盘塑料黑杯（15 cm×12 cm×10 cm）。石英砂经 1%稀盐酸浸泡淋洗，后水洗到中性，高温烘干，装杯作为栽培基质。

1.2 试验方法

试验共设常规、亏缺和补偿 3 组处理。常规处理浇 Hoagland 完全营养液；亏缺处理浇缺氮营养液；补偿处理先浇缺氮营养液，当植株表现轻度氮素亏缺（叶片有比较明显的黄化现象）后再浇完全营养液，营养液配方如表 1 。试验每隔 7 d 浇 200 mL 营养液，其他条件按常规统一管理，每处理 30 株，重复 3 次。每天观察记录植株表型特征，当亏缺处理达到轻度氮素亏缺时期，同时采集常规和亏缺处理的蕉苗全株样品；当补偿处理亏缺症状基本消失时，采集常规、亏缺和补偿处理的蕉苗全株样品。

轻度氮素亏缺时期的采样时间为处理后 30 d，补偿处理采样时间为处理后 68 d。

表 1 营养液配方

Table1 Nutrient solution

项目 Item	分子式 Molecular formula	浓 度 Potency（$mg \cdot L^{-1}$）	
		完全营养液 Complete nutrient solution	缺氮营养液 N deficiency nutrient solution
大量元素 Macro-element	$MgSO_4 \cdot 7H_2O$	616.18	616.18
	KH_2PO_4	272.18	272.18
	KNO_3	505.55	—
	KCl	—	372.80
	$Ca(NO_3)_2 \cdot 4H_2O$	1 180.75	
	CaCl	—	555.00
微量元素 Trace-element	$MnSO_4 \cdot H_2O$	1.14	1.14
	$CuSO_4 \cdot 5H_2O$	0.08	0.08
	$ZnSO_4 . 7H_2O$	0.22	0.22
	H_3BO_3	2.86	2.86
	$H_2M_OO_4$	0.09	0.09
	EDTA·FeNa	8.42	8.42

1.3 样品测定

两次样品采集后，各处理筛选生长较一致的蕉苗 5 株，重复 3 次，测量株高、倒数第 1 片完全展开叶长、叶宽和新增绿叶数等植株生长情况指标，地上部和根系分开收获，称量地上部和根系的鲜重后烘干至恒质量，测量干物质质量，并计算根冠比。根系烘干前，采用 LA2400 植物根系扫描仪及 WinRHIZO 软件测定、分析总根和各级根系的根长、根表面积及根体积，按直径＜2.0 mm、2.0~4.5 mm、＞4.5 mm 标准划分细根、中根、粗根。

1.4 数据处理

采用软件 Excel 2010 和 SPSS 16.0 对试验数据进行统计分析和作图，以 Duncan’s 新复极差法进行多重比较。

2 结果与分析

2.1 氮素亏缺和亏缺后补偿供氮对香蕉苗生长的影响

亏缺处理 10 d 后，品种I的个别植株首先开始出现初期缺氮表型症状，植株下部老叶颜色转淡，呈浅绿或黄绿色，随着缺氮程度的加深，黄化逐渐扩展蔓延到中上部叶片，品种II的植株氮素亏缺表型症状出现时期较品种I推迟 5～7 d，表现出更强的耐受低氮胁

迫能力。氮素亏缺处理使蕉苗生长受限，与常规处理植株相比亏缺处理表现矮小瘦弱。轻度氮素亏缺时期各处理植株生长情况调查结果如表 2，缺氮香蕉植株高度均显著低于常规处理，品种I、II株高分别比对照降低 25.40%、10.60%；新抽生叶片明显变小，叶长分别比对照短 17.55%、17.23%，叶宽分别比对照窄 14.85%、29.01%；叶片抽生速度较对照减慢，新增绿叶数约比对照减少 0.6～0.7 片。

补偿处理 38 d 后，各处理植株生长情况调查结果如表 3，补偿处理香蕉植株生长均恢复正常水平，株高、叶长、叶宽以及新增绿叶数与常规处理无显著差异。此时，亏缺处理植株表现中至重度缺氮症状，株高增长缓慢，生长几乎停滞，品种I、II亏缺处理株高分别比对照显著降低 40.87%、29.20%；新抽生叶片长分别比对照短 34.68%、34.45%，叶宽分别比对照窄 32.60%、43.81%；新增绿叶数约比对照减少 2.50 片，且老叶快速枯萎死亡。

表 2 轻度氮素亏缺时期蕉苗生长

Table 2 Growth of banana seedlings at stage of mild N deficiency

品种 Breed	处理 Treatment	株高 Plant height (cm)	叶长 Leaf length (cm)	叶宽 Leaf width (cm)	新增绿叶数 Number of new leaves
I	常规 Control	10.20±0.31a	13.22±0.42a	5.59±0.21a	5.00±0.40a
	亏缺 Deficiecy	7.61±0.22b	10.90±0.31b	4.76±0.34b	4.33±0.34b
II	常规 Control	10.85±0.23a	16.31±0.21a	5.48±0.23a	4.90±0.31a
	亏缺 Deficiecy	9.70±0.42b	13.50±0.35b	3.89±0.31b	4.20±0.21b

注：同列数字后的不同小写字母表示在 0.05 水平上显著差异。下同。

Note: The different small letters in the same column indicate significant differences at 0.05 level. The same below.

表 3 氮素亏缺后补偿供氮蕉苗生长

Table 3 Growth of N compensation banana seedlings after N deficiency

品种 Breed	处理 Treatment	株高 Plant height (cm)	叶长 Leaf length (cm)	叶宽 Leaf width (cm)	新增绿叶数 Number of new leaves
I	常规 Control	20.60±0.25a	26.70±0.40a	11.29±0.18a	5.10±0.15a
	亏缺 Deficiecy	12.18±0.22b	17.44±0.34b	7.61±0.25b	2.63±0.14b
	补偿 Compensate	20.70±0.30a	25.61±0.21a	11.02±0.24a	5.00±0.20a
II	常规 Control	21.92±0.23a	32.95±0.21a	11.07±0.25a	5.08±0.13a
	亏缺 Deficiecy	15.52±0.20b	21.60±0.35b	6.22±0.14b	2.53±0.30b
	补偿 Compensate	22.02±0.31a	31.58±0.25a	10.78±0.22a	5.02±0.14a

2.2 氮素亏缺和亏缺后补偿供氮对香蕉苗干物质质量的影响

轻度氮素亏缺造成的植株缺氮表型症状显而易见，但并未对植株干物质的积累造成严重的影响，调查结果见表 4。轻度氮素亏缺时期，品种I、II氮素亏缺处理植株地上部和全株的平均干物质质量与常规处理均无显著性差异；根系的干物质积累得到明显的促进，各亏缺处理植株根系干物质质量显著高于常规处理，分别提高 64.71%、87.50%；根冠比显著高于常规处理，分别提高 89.66%、100.00%，根系的干物质积累可能是植株补偿生长的关键；品种II亏缺处理植株根系干物质积累量及增幅均比品种I高，可能是其更耐受低氮胁迫能力的原因。氮素亏缺处理显著抑制了植株对水分的吸收能力，植株含水量显著低于常规处理，品种I、II地上部含水量比对照分别降低 1.57%、2.02%，根系含水量比对照分别降低 1.81%、3.81%，全株含水量比对照分别降低 1.71%、2.76%，因此，植株含水量降低是枯萎、瘦弱等缺氮表型症状的主要原因。

处理 68 d，各处理干物质积累情况调查结果如表 5。亏缺处理植株干物质积累受到明显抑制，品种I、II亏缺处理植株干物质质量较常规处理显著降低，地上部干物质质量降低 44.26%、51.65%，全株的干物质质量降低了 33.74%、42.04%，氮素亏缺对根系干物质积累的促进作用也不再明显，根系干物质与常规处理无显著差异，但亏缺处理植株根冠比仍显著高于常规处理，且与补偿处理无显著差异。氮素亏缺持续抑制植株对水分的吸收，各亏缺处理植株地上部、根系和全株的含水量均显著低于常规处理。此时，各氮素亏缺后补偿供氮处理植株干物质迅速积累，品种I、II补偿处理植株干物质质量均较亏缺处理显著增加，地上部干物质质量增加 80.88%、104.55%，根系干物质质量增加 55.0%、81.13%，全株的干物质质量增加了 71.30%、94.37%，与常规处理相比，根系干物质质量显著增加 51.22%、52.38%，根冠比显著高于常规处理。植株含水量较亏缺处理显著增加，地上部含水量增加 1.53%、2.85%，根系含水量增加 1.78%、2.32%，全株含水量增加 1.64%、2.60%，且与常规处理差异不显著。

表 4 轻度氮素亏缺时期香蕉苗干物质质量积累

Table 4 Dry matter quality of banana seedlings at stage of mild N deficiency

品种类型 Breed type	处理 Treatment	干物质质量 Dry weight (g·plant^{-1})			含水量 Content of water (%)			根冠比 Root-shoot ratio
		地上部 Shoots	根系 Roots	全株 Plants	地上部 Shoots	根系 Roots	全株 Plants	
I	常规 Control	0.59±0.02a	0.17±0.01b	0.76±0.04a	92.41±0.08a	92.39±0.12a	92.39±0.15a	0.29b
	亏缺 Deficiecy	0.51±0.03a	0.28±0.02a	0.79±0.04a	90.84±0.11b	90.58±0.19b	90.68±0.12b	0.55a
II	常规 Control	0.78±0.04a	0.24±0.04b	1.02±0.04a	92.12±0.12a	93.74±0.10a	92.70±0.11a	0.31b
	亏缺 Deficiecy	0.73±0.03a	0.45±0.03a	1.18±0.02a	90.10±0.10b	89.93±0.16b	89.94±0.12b	0.62a

表 5 氮素亏缺后补偿供氮香蕉苗干物质积累

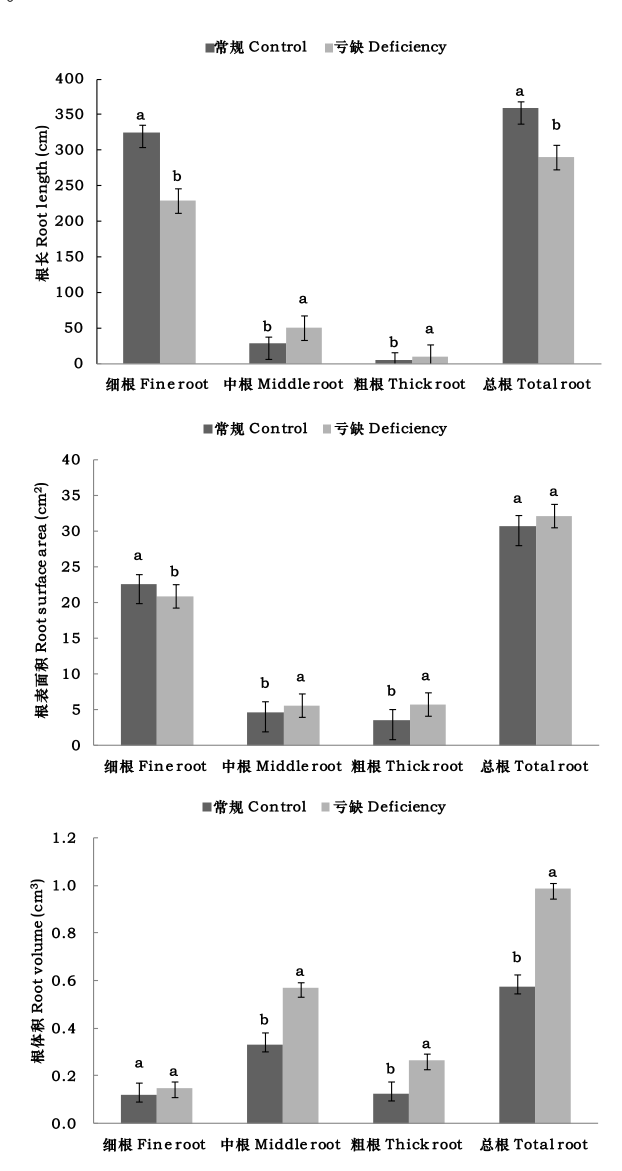
Table 5 Dry matter quality of N compensation banana seedlings after N deficiency

品种类型 Breed type	处理 Treatment	平均干物质质量 Dry weight per plant (g)			含水量 Content of water (%)			根冠比 Root-shoot ratio
		地上部 Shoots	根系 Roots	全株 Plants	地上部 Shoots	根 Roots	全株 Plants	
I	常规 Control	1.22±0.08a	0.41±0.02b	1.63±0.10a	92.22±0.13a	93.94±0.08a	93.72±0.12a	0.34b
	亏缺 Deficiecy	0.68±0.03b	0.40±0.02b	1.08±0.07b	90.50±0.30b	90.43±0.07b	90.48±0.16b	0.59a
	补偿 Compensate	1.23±0.08a	0.62±0.03a	1.85±0.11a	92.03±0.14a	92.21±0.15a	92.12±0.23a	0.50a
II	常规 Control	1.82±0.08a	0.63±0.05b	2.45±0.12a	92.91±0.22a	92.27±0.31a	92.36±0.11a	0.35b
	亏缺 Deficiecy	0.88±0.04b	0.53±0.03b	1.42±0.08a	89.73±0.30b	90.08±0.16b	89.85±0.12b	0.60a
	补偿	1.80±0.10a	0.96±0.03a	2.76±0.15a	92.58±0.12a	92.40±0.17a	92.45±0.16a	0.53a

Compensate

2.3 氮素亏缺和亏缺后补偿供氮对香蕉苗根系形态的影响

各处理香蕉苗根系形态调查结果由图 1，图 2 可知，品种I、II常规处理蕉苗根系＜2 mm 的细根根长比例为 90.66%、90.08%，香蕉苗的根系明显以细根为主。轻度氮素亏缺时期，缺氮显著抑制了香蕉苗细根根长的增加，总根根长显著降低，品种I、II细根根长分别比对照降低 29.32%、13.68%，总根根长分别降低 18.91%、13.12%。缺氮未抑制蕉苗直径>2 mm 的中根和粗根根长的增加，品种I中根、粗根根长甚至比对照显著增加，品种II中根、粗根根长略低于对照，差异不显著。缺氮促进了根系表面积的增加，品种I、II粗根表面积分别比对照显著增加 61.20%、326.49%，总根表面积分别比对照增加 4.38%、11.85%。缺氮促进了根系体积的增加，中根、粗根以及总根体积均显著增加，品种I、II中根体积分别比对照增加 72.73%、90.83%，粗根体积分别比对照增加 114.52%、37.96%，总根体积分别比对照增加 71.78%、66.55%。可见，缺氮显著促进了根系的增粗，根系的表面积以及体积的增加，是香蕉苗在氮素亏缺条件下增加干物质积累，实现氮素高效吸收的根系形态基础。



不同小写字母表示同一直径不同处理间在 0.05 水平上差异显著。下同。

The different small letters above the bars indicate significant differences between treatments of the same diameter at 0.05 level. The same below.

图 1 轻度氮素亏缺时期香蕉苗根系形态（品种I）

Fig. 1 Root morphology of banana seedlings at stage of mild N deficiency (cultivar I)

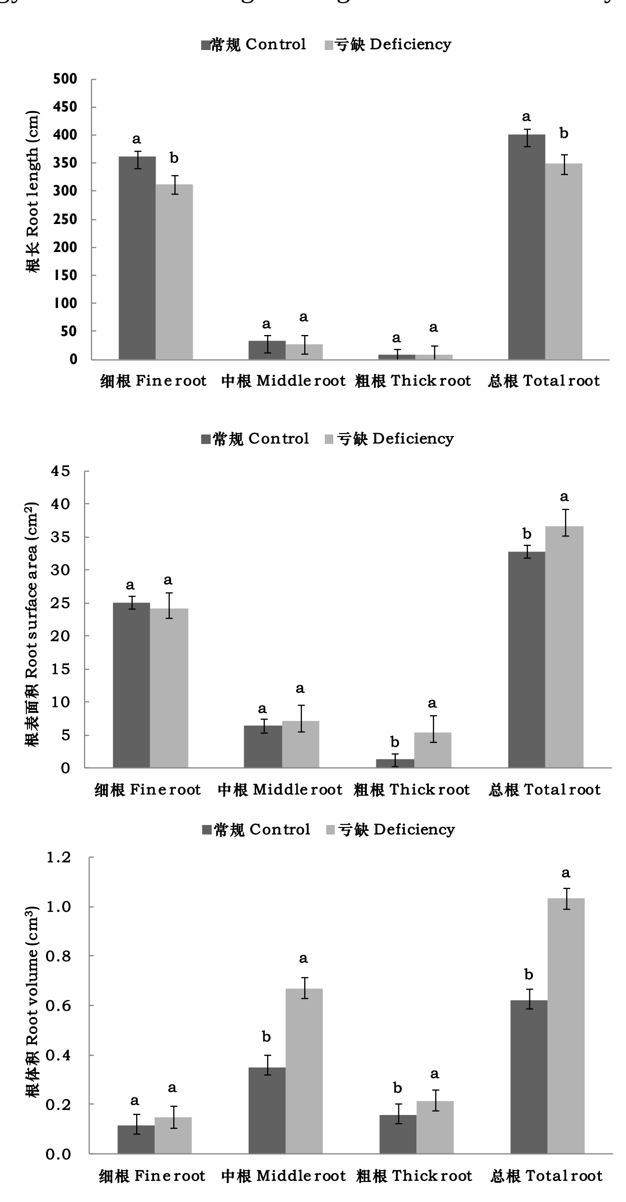


图 2 轻度氮素亏缺时期香蕉苗根系形态（品种II）

Fig. 2 Root morphology of banana seedlings at stage of mild N deficiency (cultivar II)

各处理香蕉苗根系形态调查结果由图 3，图 4 可知，各补偿处理植株根系恢复生长，表现出一定的补偿效应。品种I、II补偿处理细根、中根及总根根长均较亏缺处理显著增加，其中总根长分别增加 71.06%、70.54%，且中根、粗根根长与常规处理差异不显著，但细根及总根根长仍显著低于常规处理；补偿处理中根、粗根及总根表面积较亏缺处理及常规处理略高，处理间差异不显著；中根、粗根及总根体积较常规处理显著增加，其中总根体积分别增加 61.80%、45.92%，且细根、粗根及总根体积与亏缺处理间差异不显著。此时，氮素亏缺处理植株根系生长受到明显影响，细根、中根及总根长显著降低，品种I、II总根长分别比对照降低 48.17%、40.50%，降幅较轻度缺氮时期下降 29.26%、

27.38% ；根系表面积参数与对照差异不显著；中根、粗根及总根体积仍显著增加，总根体积分别比对照增加 61.23%、47.20%，增幅较轻度缺氮时期分别下降 10.55%、19.35%，说明，不同缺氮程度对蕉苗根系形态的影响趋势一致，影响大小与缺氮持续时间相关。

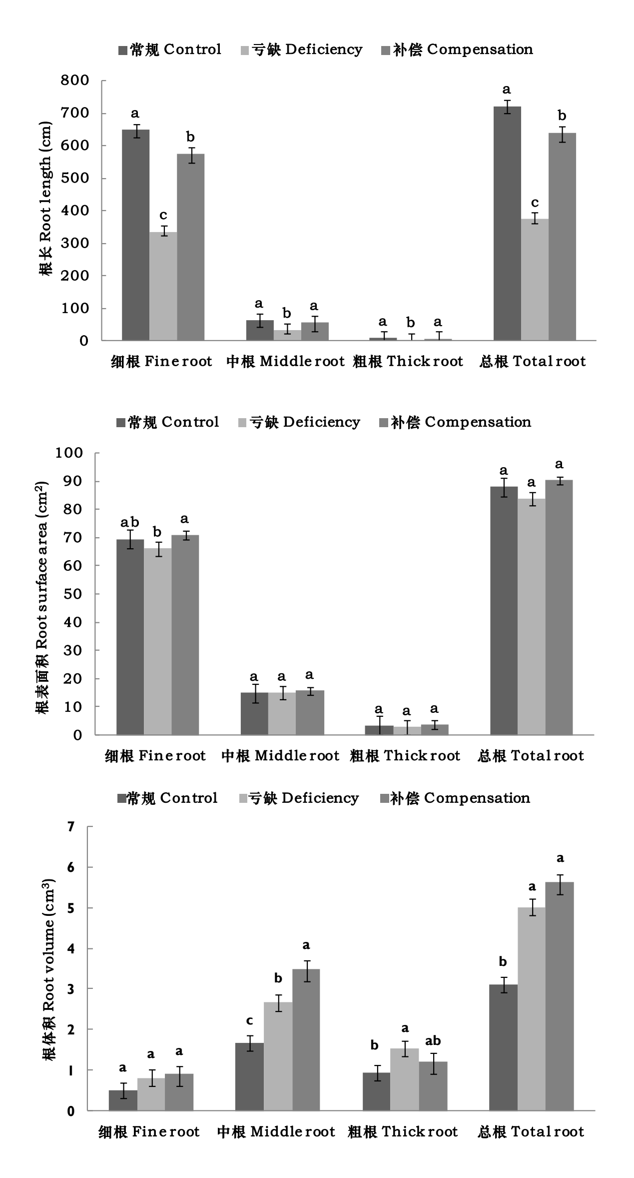


图 3 氮素亏缺后补偿供氮香蕉苗根系形态（品种I）

Fig. 3 Root morphology of N compensation banana seedlings after N deficiency (cultivar I)

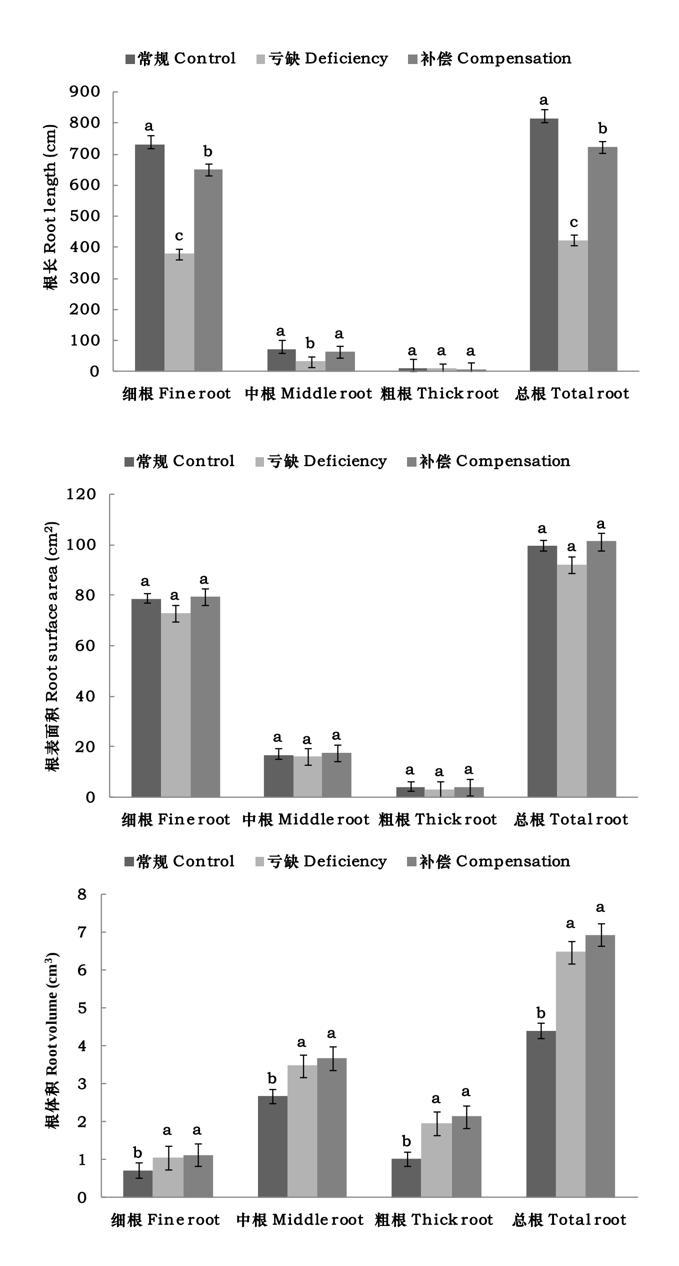


图 4 氮素亏缺后补偿供氮香蕉苗根系形态（品种II）

Fig. 4 Root morphology of N compensation banana seedlings after N deficiency (cultivar II)

3 讨论与结论

氮素是植物生长发育所必需的营养要素，供氮水平显著影响植株的生长发育，香蕉在氮素亏缺条件下，细胞的分裂和伸长受抑制，植株出现矮小、叶数减少、叶色变淡、新叶变小等缺氮症状。氮素亏缺抑制香蕉地上部和根系生长，干物质质量积累下降，根冠比增长（Lizarazo et al., 2013）。本研究氮素亏缺处理后，各品种均出现不同程度的缺氮症状，株高、叶长、叶宽及新增绿叶数均显著降低，其中粉蕉品种‘育粉 6 号’缺氮症状出现时期较普通香蕉推迟，具有更强的耐受低氮能力，这与 ABB 型粉蕉品种自身的氮素吸收和利用能力有关。本研究发现轻度氮素亏缺对干物质的积累抑制作用不明显，地上部和全株的平均干物质质量与常规处理均无显著性差异；而根系的干物质积累得到明显的促进，各亏缺处理植株根系干物质质量显著高于常规处理，根冠比增加，这可能是植株为了适应氮素亏缺，通过协调根系与地上部生长和干物质积累，产生了一种

对氮素需求的补偿效应，与何亮珍和蒋元利（2017）研究结果一致。氮素亏缺处理香蕉苗地上部、根系以及全株含水量均显著降低，说明氮素吸收与水分吸收耦合，缺氮直接影响了根系对水分的吸收能力，缺氮表型症状与植株含水量的降低直接相关。随着氮胁迫时间延长，亏缺处理植株缺氮症状逐渐明显，干物质积累受到明显抑制，地上部干物质质量显著降低，氮素亏缺对根系干物质累积的促进作用已不再明显，根系干物质与常规处理无显著差异，氮素亏缺持续抑制植株对水分的吸收。轻度氮素亏缺后补偿供氮，各补偿处理植株生长趋向正常，氮素亏缺表型症状消失。干物质迅速累积，植株干物质质量均较亏缺处理显著增加，且根系干物质质量及根冠比显著高于常规处理，根系恢复对水分的吸收能力，植株含水量与常规处理差异不显著，与施晟璐等（2015）的研究结果有类似之处，复氮处理使菘蓝幼苗的植株高度、根系鲜重、叶片鲜重及干重显著增加。De et al.（2016）研究也表明，黑麦草氮肥施用时期推迟 3 d，可显著提高产量。

作物对水分和养分的吸收利用与根系的形态特征密切相关，直接影响作物生长发育和产量形成（田中伟等，2015）。施肥不仅能够改善土壤肥力状况，同时对根系在耕层中的延伸生长和空间分布起促进作用。素亏缺不仅影响根系干物质的积累，而且改变了根系形态特征。氮亏缺胁迫下光合物质被用来构建发达的根系，促进更多的氮素吸收以及干物质的形成与积累（李文娆等，2017）。乔海涛等（2009）研究认为，氮素亏缺后根系总长、总表面积和总体积增加，而曾秀成等（2010）研究表明，氮素亏缺后根系总长、总表面积显著降低。王准等（2020）研究表明，低氮处理下根系干物质质量增加，根系形态特征无显著性变化。土壤环境中氮素的盈亏首先影响植物的根系，武永军等（2012）研究表明，玉米氮素亏缺处理根系活力明显下降，恢复正常供氮后，根系活力仍无法恢复正常水平。本研究轻度氮素亏缺显著抑制了香蕉苗细根根长的增加，总根根长显著降低，显著促进了香蕉苗根系的增粗，根系的表面积以及体积的增加。适时的补偿供氮处理后，各补偿处理中根、粗根及总根表面积及体积均较亏缺处理及常规处理略高。香蕉幼苗期生物量在整个生育期中相对小，需氮素不多，虽然氮素亏缺胁迫使根系的长度下降，但根系通过表面积以及体积的增加以获得更多的养分和水分吸收，可能正是香蕉苗在逆境下为了满足生存的需要寻找氮源，通过自我调节功能所表现出的补偿生长效果。但长时间氮素亏缺势必影响生长。伴随生长发育，生长量不断积累增大，氮素亏缺胁迫严重程度加重，自我调节能力范围超限，补偿生长效应难以表现。氮素亏缺胁迫对根系形态特征的影响与胁迫持续时间（阈值）和作物品种根系生长发育特性有关，且一定的时间积累是生长补偿效应的前提。因此，有关氮素亏缺与补偿对根系形态的研究结果不尽相同。

综上所述，生产中可以综合考虑合理利用补偿效应，虽然采用轻度氮素亏缺胁迫后恢复供氮的方式来培育香蕉苗，有利于其在田间栽培的生长，但必须特别注意氮素亏缺时期、亏缺程度和亏缺强度的控制。今后还将进一步开展香蕉各个生育阶段氮素亏缺与补偿效应研究，探明氮素亏缺敏感期、需求关键期及补偿有效期，为生产上利用香蕉品种自身调节和补偿机制，发挥氮高效利用潜力，减肥增效提供理论依据。

参考文献：

ACEVEDO E, HSIAO TC, HENDERSON DW, 1971. Immediate and subsequent growth responses of maize leaves to changes in water status[J]. Plant Physiol, 48: 631-636.

CAO M, SONG YY, FAN XL, 2012. Effects of content of controlled release nitrogen and potassium on banana yield and NPK fertilizer use efficiency[J]. J NW A & F Univ (Nat Sci Ed), 40(11): 35-41. [曹明，宋媛媛，樊小林，2012.控释氮钾比例对香蕉产量及氮磷钾肥料利用率的影响[J]. 西北农林科技大学学报，40(11): 35-41.]

CHU LL, ZHANG ZX, 2010. Effects of nitrogen nutrition and water stress on compensation effect of the yield of soybean[J]. Acta Ecol Sin, 30(10): 2665-2670.[褚丽丽，张忠学，2010. 氮素营养与水分胁迫对大豆产量补偿效应的影响[J]. 生态学报，30(10): 2665-2670.]

DE B, DERU JGC, HOEKSTRA NJ, et al., 2016. Strategic timing of nitrogen fertilization to increase root biomass and nitrogen-use efficiency of *Lolium perenne* L.[J]. Plant and Soil, 407(1-2): 81-90.

FAN XL, 2007. Banana nutrition and fertilization[M]. Beijing: China Agricultural Press: 58-79.[樊小林，2007. 香蕉营养与施肥[M]. 北京：中国农业出版社：58-79.]

GUO CM, LIU WJ, FAN XL, 2017. Effect of alkaline slow release nitrogen fertilizer on soil pH and nitrogen use efficiency of banana[J]. J Plant Nutr Fert, 23(1): 128-136. [郭春铭，刘卫军，樊小林，2017. 碱性长效缓释氮肥对蕉园土壤 pH 和香蕉氮肥利用效率的影响[J].植物营养与肥料学报，23(1): 128-136.]

GUO J, LIU X, ZHANG Y, et al., 2010. Significant acidification in major chinese croplands[J]. Science, 327(5968): 1008-1010.

HE LZ, JIANG YL, 2017. Effects of nitrogen deficiency on the growth and physiology of leaf-vegetable sweet potato[J]. Hunan Agric Sci, (3): 20-22. [何亮珍，蒋元利，2017. 缺氮对叶用甘薯生长及生理的影响[J]. 湖南农业科学，(3): 20-22.]

HU CJ, 2020. Analysis on the change and trend of banana market in the world[J]. Trop Agric Chin, (6):39-41. [胡从九，2020. 浅析世界香蕉市场变化及趋势[J]. 中国热带农业，(6)：39-41.]

JU XT, XING GX, CHEN XP, et al., 2009. Reducing environmental risk by improving N management in intensive Chinese agricultural systems[J]. Pro Natl Acad Sci USA, 106(9): 3041-3046.

LI WR, FAN YL, FENG SZ, et al., 2017. Effect of coupling of water and nitrogen on shoot and root growth and water use efficiency of cotton seedlings[J]. J Henan Agric Sci, 46(9): 18-24. [李文娆，范雨龙，冯士珍，等，2017. 水氮耦合对棉花幼苗根冠生长和水分利用效率的影响[J]. 河南农业科学，46(9): 18-24.]

LIU F, LIN LH, ZHANG LD, et al., 2019. Effects of N deficiency and resupply of N nutrient on banana growth and root morphological parameters[J]. J Fruit Sci, 36 (1): 67-75.[刘芳，林李华，张立丹，等，2019. 缺氮和恢复供氮对香蕉苗生长和根系形态参数的影响[J]. 果树学报，36(1)：67-75.]

LIZARAZO MÁ, HERNÁNDEZ CA, FISCHER G, et al., 2013.Response of the banana passion fruit（*Passiflora tripartite* var. *mollissima*）to different levels of nitrogen，potassium and magnesium[J]. Agr Colom, 31(2): 184-194.

SHI SL, YE BZ, ZHANG RZ, et al., 2015. Effect of N deficiency and N recovery on growth and nitrogen metabolism of *Isatis indigotica* seedings[J]. Acta Bot Boreal-Occident Sin, 35(3): 523-529. [施晟璐，叶冰竹，张润枝，等，2015. 缺氮和复氮对菘蓝幼苗生长及氮代谢的影响 [J]. 西北植物学报，35(3): 523-529.]

QIAO HT, YANG HQ, SHEN WB, et al., 2009. Effect of nitrogen-deficient and iron-deficient on root architecture of young seedlings of *Malus hupehensis*（Pamp）Rehd.[J]. Acta Hortic Sin, 36(3):321-326. [乔海涛，杨洪强，申为宝，等，2009.缺氮和缺铁对平邑甜茶幼苗根系构型的影响[J]. 园艺学报，36(3): 321-326.]

TANG GP, XIONG QQ, ZHONG L, et al., 2017. Primary research on the formation and its physiological mechanism of nitrogen deficiency compensatory effects in d ouble season early rice[J]. J Nucl Agric Sci, 31(8):1585-1593.[汤国平，熊强强，钟蕾，等，2017. 双季早稻氮素亏缺补偿效应的形成及其生理机制初探[J]. 核农学报，31(8)：1585-1593.]

TIAN ZW, FAN YH, YIN M, et al., 2015. Genetic improvement of root growth and its relationship with grain yield of wheat cultivars in the Middle-Lower Yangtze river[J]. Acta Agr Sin, 41(4):613-622. [田中伟，樊永惠，殷美，等，2015.长江中下游小麦品种根系改良特征及其与产量的关系[J]. 作物学报，41(4): 613-622.]

WANG Z, ZHANG HH, DONG Q, et al., 2020. Screening and verification of low nitrogen tolerant and nitrogen sensitive cotton germplasm[J]. Cotton Sci, 32(6):538-551.[王准，张恒恒，董强，等，2020. 棉花耐低氮和氮敏感种质筛选及验证[J]. 棉花学报，32(6)：538-551.]

WEI SX, XIE ZX, LI ZY, et al., 2012. Soil fertility investigation and evaluation for Banana gardens in Guangxi[J]. Chin J Trop Crops, 33(8): 1371-1377. [魏守兴，谢子四，李志阳，等，2012. 广西主要蕉园土壤肥力调查及评价[J]. 热带作物学报，33(8): 1371-1377.]

WU HJ, WANG S, GAO LM, et al., 2018. Nutrient-derived environmental impacts in Chinese agriculture during 1978-2015[J].J Environ Manag, 217(5): 762-774.

WU YJ, SHEN YF, YAN QF, et al., 2012. Effect of N deficiency and N recovery treatment on root growth，root activity，content of NO_3-N and aminoacid[J]. Acta Agric Boreal-Occident Sin, 21(12): 61-64. [武永军，沈玉芳，颜秦峰，等，2012. 缺氮复氮处理对玉米根系生长、根系活力、硝态氮及氨基酸含量的影响[J]. 西北农业学报，21(12): 61-64.]

YAN XY, XIA LL,TI CP, 2018. The strategy of nitrogen application for both crop yield and environment[J]. Bull Chin Acad Sci, 33(2):177-183.[颜晓元，夏龙龙，遆超普，2018. 面向作物产量和环境双赢的氮肥施用策略[J]. 中国科学院院刊，33(2)：177-183.]

YANG BM, YAO LX, LI GL, et al., 2008. Evaluation on characteristics of nutrient absorption of soils in banana plantation in Guangdong Province[J]. Chin J Soil Sci，39(6): 1315-1320. [杨苞梅，姚丽贤，李国良，等，2008. 广东省香蕉主产区蕉园土壤养分的吸附特性研究[J]. 土壤通报，39(6): 1315-1320.]

ZENG XC, WANG WM, LUO MN, et al., 2010. Effects of different element deficiencies on soybean growth and root morphology[J]. J Plant Nutr Fert, 16(4): 1032-1036. [曾秀成，王文明，罗敏娜，等，2010. 缺素培养对大豆营养生长和根系形态的影响[J]. 植物营养与肥料学报，16(4): 1032-1036.]

ZHAI BN, LI SX, 2005. Response to nitrogen deficiency and compensation on growth and yield of winter wheat[J]. J Plant Nutr Fert, 21(3): 308-313. [翟丙年，李生秀，2005. 氮素对冬小麦生长发育及产量的亏缺和补偿效应[J]. 植物营养与肥料学报，21(3):308-313.]

ZHAO M, LI JG, ZHANG B, et al., 2006. The compensatory mechanism in exploring crop production potential[J]. Acta Agr Sin, 32(10): 1566-1569. [赵明，李建国，张宾，等，2006. 论作物高产挖潜的补偿机制[J]. 作物学报，32(10): 1566-1569.]